

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Разработка CuBr-лазера с увеличенной длительностью импульсов генерации

УДК 621.373.826.038.823

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Т61	Карасев Николай Викторович		19.06.2020

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Тригуб Максим Викторович	к.т.н.		19.06.2020

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук Ирина Вадимовна	к.т.н.		19.06.2020

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна			19.06.2020

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Плазменно-пучковые и электроразрядные технологии	Жгун Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

Томск – 2020 г.

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные</i>	
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем</i> .
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты</i> .
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
<i>Универсальные</i>	
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Д.В. Жгун

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
4Т61	Карасев Николай Викторович

Тема работы:

Разработка CuBr-лазера с увеличенной длительностью импульсов генерации	
Утверждена приказом директора ИШНПТ	Приказ № 59-65/с от 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	19.06.2020
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект исследования представляет из себя лазер на парах бромида меди, возбуждаемый цугами импульсов.</p> <p>Цель работы – отследить зависимость длительности импульса генерации, а также характеристик разряда от изменения времени задержки.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Литературный обзор <ol style="list-style-type: none"> 1.1. Понятие самоограниченного перехода 1.2. Лазер на парах меди <ol style="list-style-type: none"> 1.2.1.Схема рабочих уровней 1.2.2.Источник питания 1.2.3.Газоразрядная трубка 1.3. Гибридный лазер 1.4. Области применения 1.5. Выводы к главе 1 2. Объекты и методы исследования <ol style="list-style-type: none"> 2.1. Возбуждение лазеров на парах металлов цугами импульсов 2.2. Описание экспериментальной установки 2.3. Методика проведения эксперимента 2.4. Выводы к главе 2 3. Результаты исследований

	3.1. Снятие характеристик лазера на парах брома меди 3.2. Снятие характеристик лазера на парах брома меди с добавкой водорода 3.3. Выводы к главе 3 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 5. Социальная ответственность Заключение Список использованных источников
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Кащук И.В., доцент, к.т.н., ОСГН ШБИП НИ ТПУ
Социальная ответственность	Черемискина М.С., ассистент, ООТД ШБИП НИ ТПУ

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.02.2020
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Тригуб М.В.	к.т.н.		10.02.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Т61	Карасев Николай Викторович		10.02.2020

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Отделение материаловедения
Период выполнения осенний / весенний семестр 2019 /2020 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	19.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
25.05.2020	Литературный обзор	15
25.05.2020	Объекты и методы исследований	25
02.04.2020	Экспериментальная часть, анализ результатов исследований	40
09.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
09.05.2020	Социальная ответственность	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Тригуб М.В.	К.Т.Н.		19.06.2020

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Жгун Д.В.	К.Т.Н.		19.06.2020

Реферат

Выпускная квалификационная работа 87 с., 38 рис., 31 табл., 36 источников.

Ключевые слова: лазер на парах бромида меди, управление генерацией, длительность импульса генерации, цуг импульсов, энерговыход, время задержки.

Объектом исследования является лазер на парах бромида меди. Цель работы – отследить зависимость длительности импульса генерации, а также характеристик разряда от изменения времени задержки.

В процессе исследования проводилась регистрация импульсов разрядного тока, разрядного напряжения и генерации для различного числа импульсов в цуге с помощью осциллографа. Проводилось измерение мощности излучения с помощью прибора ИМО-2. Составлялись графики зависимости параметров разряда и излучения от времени задержки. Сравнивались характеристики CuBr-лазера с добавкой водорода и без.

В результате исследования получены графики зависимости параметров разряда и лазерного излучения от времени задержки и количества импульсов в цуге.

Степень внедрения: исследования проводились на лабораторной установке.

Область применения: лазерный монитор, лазерная спектроскопия, резка, медицина.

Экономическая эффективность/значимость работы на данном этапе исследований не определена.

В будущем планируется дальнейшее изучение способов регулирования параметров излучения CuBr-лазера.

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

лазер: устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения;

активная среда: среда, в которой создается состояние с инверсной населенностью;

накачка: создание инверсной населенности в активной среде;

рабочие уровни: уровни, между которыми происходит генерация лазерного излучения

резонатор: устройство, выделяющее в пространство избирательное направление пучка фотонов и формирующее выходящий световой поток.

гибридный лазер: лазер на парах меди или бромида меди с добавкой водорода или бромводорода;

лазерная абляция: метод удаления вещества с поверхности лазерным импульсом;

стробирование: метод выделения некоторого интервала на временной оси для увеличения вероятности обнаружения полезных сигналов на фоне помех.

Сокращения

В данной работе применены следующие сокращения:

ИОА СО РАН – Институт оптики атмосферы СО РАН

ЛКЭ – лаборатория квантовой электроники;

ЛПМ – лазер на парах меди;

ЛПГМ – лазер на парах галогенида меди;

ЛПБМ – лазер на парах бромида меди;

ГРТ – газоразрядная трубка;

ЧСИ – частота следования импульсов;

СРНВ – селективный реверсивный натекатель водорода.

Содержание

Введение	11
1. Литературный обзор	13
1.1. Понятие самоограниченного перехода	13
1.2. Лазер на парах меди	14
1.2.1. Схема рабочих уровней	14
1.2.2. Источник питания	15
1.2.3. Газоразрядная трубка	17
1.3. Гибридный лазер	20
1.4. Области применения	24
1.5. Выводы к главе 1	25
2. Объекты и методы исследования	26
2.1. Возбуждение лазеров на парах металлов цугами импульсов	26
2.2. Описание экспериментальной установки	29
2.3. Методика проведения эксперимента	30
2.4. Выводы к главе 2	31
3. Результаты исследований	32
3.1. Снятие характеристик лазера на парах бромида меди	32
3.2. Снятие характеристик лазера на парах бромида меди с добавкой водорода	41
Выводы к главе 3	47
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	48
4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований	49
4.1.1. Анализ конкурентных технических решений	49
4.1.2. SWOT – анализ	51
4.2. Планирование научно-исследовательских работ	54
4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования	54
4.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ	55
4.2.3. Разработка графика проведения исследования	56

4.2.4. Бюджет научного исследования	60
4.2.4.1. Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)	60
4.2.4.2. Специальное оборудование для экспериментальных работ	61
4.2.4.3. Расчет амортизации специального оборудования	62
4.2.4.4. Основная заработная плата	63
4.2.4.5. Дополнительная заработная плата	64
4.2.4.6. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	64
4.2.4.7. Накладные расходы	65
4.3. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	66
4.3.1. Интегральный показатель финансовой эффективности	66
4.3.2. Интегральный показатель ресурсоэффективности	67
Выводы по разделу	69
5. Социальная ответственность	70
Введение	72
5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	73
5.2. Производственная безопасность	75
5.2.1. Анализ вредных факторов производственной среды	76
5.2.1.1. Электрическое и магнитное поля	76
5.2.1.2. Шумовое воздействие	77
5.2.2. Анализ опасных факторов производственной среды	77
5.2.2.1. Электрический ток	77
5.2.2.2. Лазерное излучение	78
5.3. Экологическая безопасность	80
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	81
Выводы по разделу	82
Заключение	83
Список использованных источников	84

Введение

Лазеры на парах меди (ЛПМ), как и другие лазеры на парах металлов, были изобретены в 60-е годы XX века. Большой интерес к исследованию данного вида лазеров связан с рядом отличительных особенностей выходного излучения, среди которых [1 – 2]:

- высокая частота следования импульсов (ЧСИ);
- относительно высокий КПД (1 – 2 %);
- однородная среда;
- возможность генерации двух спектров разных длин волн (510,5 и 578,2 нм).

Конструкция ЛПМ является весьма универсальной, что и позволило сконструировать на его базе большое количество установок для различных областей применения. Лазерная резка активно используется промышленностью, визуально-оптическая диагностика – в научных исследованиях. ЛПМ применяется в такой высокотехнологичной отрасли, как производство нанодисперсных порошков. Активно идет внедрение установок на базе ЛПМ в медицину, в частности, в дерматологию и косметологию.

Принцип работы ЛПМ основан на явлении самоограниченного перехода. Это значит, что работать данный лазер может только в импульсно-периодическом режиме. Несмотря на то, что область применения ЛПМ весьма широка, импульсно-периодический режим работы накладывает некоторые ограничения.

На данный момент наука заинтересована в создании ЛПМ с увеличенной длительностью импульсов генерации. Возможность генерации импульсов излучения большой длительности может оказаться полезной при создании лазерного монитора и визуализации удаленных объектов [3]. Изучение особенностей оптических систем с усилителями яркости света

может существенно расширить круг возможных применений и стимулировать создание новых оптико-электронных устройств [4].

Для создания ЛПМ с увеличенной длительностью импульса генерации необходимо иметь систему управления генерацией, позволяющую изменять длительность импульса. В данной работе управление осуществляется регулированием времени задержки между импульсами диссоциации и генерации.

Цель работы – отследить зависимость длительности импульса генерации, а также характеристик разряда от изменения времени задержки.

Исследуемый ЛПМ разработан в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА) СО РАН в лаборатории квантовой электроники (ЛКЭ). Научная новизна исследования объясняется уникальностью конструкции системы управления лазерным излучением, а также уникальностью самого способа управления.

Полученные в ходе исследования результаты позволят осуществить создание установок с возможностью регулирования параметров излучения. Подобные установки могут применяться не только в научных исследованиях (лазерная спектроскопия), но и в промышленности (лазерная резка, производство нанопорошков), а также в медицине (дерматология, косметология).

1. Литературный обзор

1.1 Понятие самоограниченного перехода

Лазерами на самоограниченных переходах называются системы, инверсная населенность которых исчезает в результате появления генерации [5]. Находящиеся в основном состоянии электроны заселяют верхний рабочий уровень. По истечении некоторого времени электроны переходят на нижний рабочий уровень, являющийся метастабильным, по сравнению с верхним. Во время этого перехода возникает лазерное излучение с определенной длительностью. Подобная самоограниченность генерации по времени достигается за счет разности времени жизни верхнего рабочего и метастабильного уровней.

Лазеры на парах металлов являются наиболее типичными представителями лазеров на самоограниченных переходах.

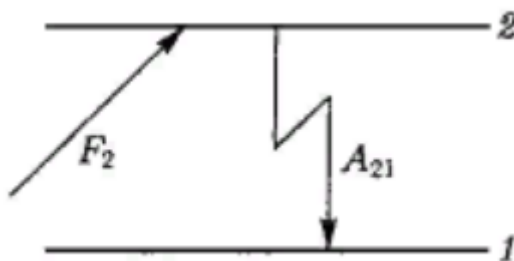


Рисунок 1.1 – Схема уровней с самоограниченным переходом [2]

Из данного рисунка следует, что вероятность заселения верхнего рабочего уровня должна быть больше вероятности заселения метастабильного уровня. Кроме того, переход от верхнего рабочего уровня в основное состояние должен быть запрещенным.

В качестве источника возбуждения выступает электрический разряд, электроны которого, путем соударения, передают энергию атому активного вещества.

Время генерации определяется временем жизни верхнего рабочего уровня и составляет $10^{-8} - 10^{-7}$ с [5]. Следовательно, работать лазер может

только в импульсном режиме. Для более эффективной работы необходимо создать импульсный источник питания. Длительность импульса источника питания должна быть близкой к времени жизни верхнего рабочего уровня (см. р. 1.2.2).

1.2. Лазер на парах меди

Характерной особенностью лазеров на парах металлов является высокий коэффициент усиления активной среды. В медных лазерах он достигает $\sim 10^2 \text{ см}^{-1}$ и поэтому генерация в них при достаточной длине может возникать даже в отсутствии зеркал резонатора [5]. За счет этого достигается высокое значение КПД лазера на парах меди (ЛПМ), высокая мощность при меньших габаритах и, как следствие, заинтересованность в создании промышленных установок на базе ЛПМ.

1.2.1. Схема рабочих уровней

Для начала необходимо рассмотреть принцип работы ЛПМ.

Основным состоянием для атома меди является электронная конфигурация $3d^{10}4s^1$. За счет электронного удара $4s$ электрон забрасывается на $4p$ уровень (Возбужденные уровни - $^2P_{3/2}$ и $^2P_{1/2}$). При переброске одного $3d$ электрона на $4s$ уровень и при переходе электрона с $4d$ обратно на $4s$ происходит генерация.

Согласно [6], скорость возбуждения в P -состоянии (за счет электронного удара) оказывается больше, чем скорость возбуждения в D -состоянии. Связано это с большим сечением перехода.

Хотя переход $^2P \rightarrow ^2S_{1/2}$ является разрешенным, из-за высокого давления паров меди происходит захват излучения [6], следовательно, вероятность такой релаксации снижается.

Поскольку переход из метастабильного состояния в основное является запрещенным, релаксация происходит путем соударения с холодными электронами.

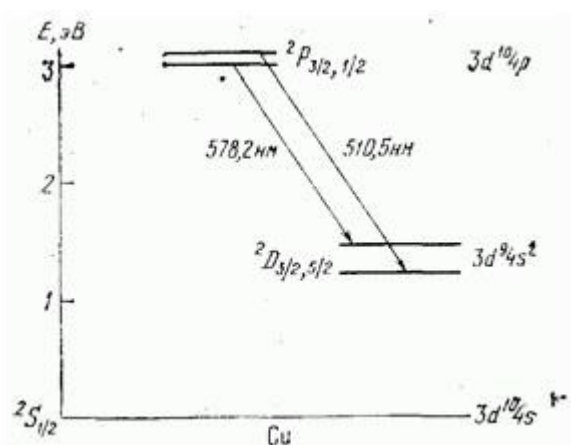


Рисунок 1.2 – Схема рабочих уровней медного лазера [7]

Из рисунка видно, что ЛПМ может, в зависимости от перехода может генерировать излучение как в зеленом ($\lambda = 510,5 \text{ нм}$), так и в желтом спектре ($\lambda = 578,2 \text{ нм}$). При чем большей энергии лазерного перехода соответствует зеленый спектр.

1.2.2. Источник питания

Как было сказано в р. 1.1, источник питания ЛПМ должен быть импульсным. Данный источник питания представляет из себя разряд накопительной емкости на ГРТ. Основными элементами являются схемы выпрямления, полумостовой инвертор; высоковольтный трансформатор. Для формирования сигнала определенной частоты в схему включен полумостовой инвертор. Коммутация осуществляется с помощью тиратрона VL_1 .

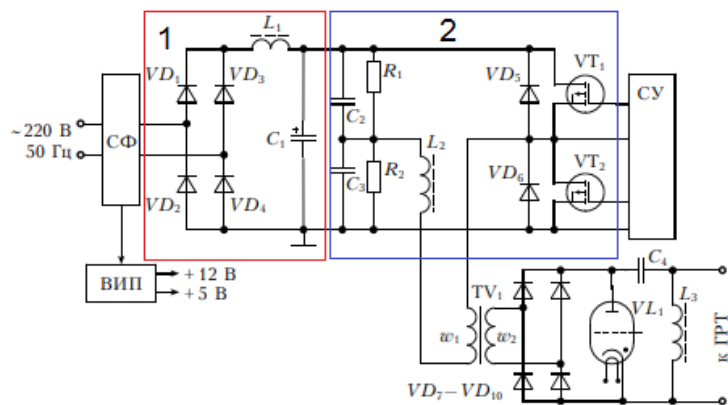


Рисунок 1.3 - Функциональная схема источника питания [8]: 1 – Мостовая схема выпрямления; 2 – Полумостовой инвертор; TV1 – Высоковольтный трансформатор; СУ – Схема управления; C4 – Емкостной накопитель энергии; СФ – сетевой фильтр

Со снижением емкости снижается и энерговыход в разряд. В работе [9] проведены эксперименты со значением накопительной емкости 1650 пФ, к которой последовательно подключались дополнительные емкости 680 и 150 пФ. Несмотря на снижение энерговыхода, КПД лазера увеличивается. Связано это с повышением селективности возбуждения рабочих уровней, а также со снижением доли энергии, идущей на разогрев трубки [9]. Такой режим работы называется режим пониженного энерговыхода в разряд.

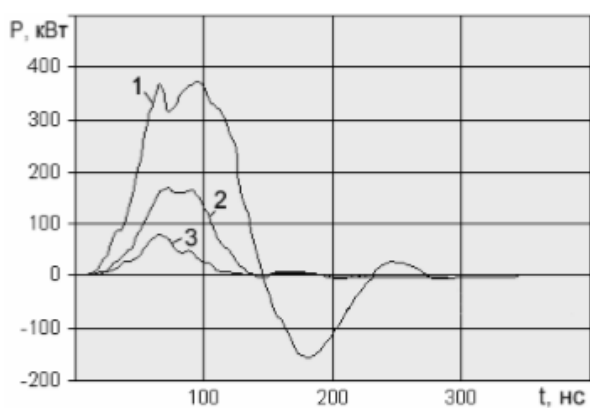


Рисунок 1.4 – Диаграммы мгновенной мощности на активном элементе: 1 – обычный режим; 2 – $C_2 = 680$ пФ, 3) $C_2 = 165$ пФ [9]

Определенный интерес представляет возбуждение активной среды ЛПМ цугами импульсов. Формирование периодически повторяющихся цугов

импульсов позволяет изменять частоту следования импульсов, возбуждающих лазерную среду, без изменения вкладываемой в разряд средней мощности [8]. Кроме того, цуговой режим работы открывает широкие перспективы в создании системы управления лазерным пучком (см. р. 2.1).

1.2.3. Газоразрядная трубка

Пары металла заключены в трубку из окиси алюминия. Необходимая высокая температура в трубке обычно поддерживается мощностью, рассеиваемой в трубке при прохождении повторяющихся импульсов тока. Анод и катод имеют форму кольцеобразных электродов и помещаются на концах трубки [6].

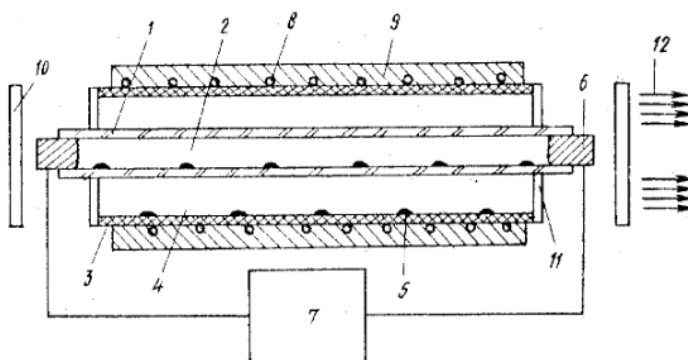


Рисунок 1.5 - Схематическое представление конструкции лазера на парах меди; 1 – трубка из тугоплавкого материала, 2 – разрядный объем; 3 – кожух из высокотемпературного материала; 4 – генерирующий объем; 5 – активный металл; 6 – электроды; 7 – источник питания; 8 – нагреватель; 9 – тепловая изоляция; 10 – зеркала; 11 – оптические окна; 12 – излучение. [10]

С помощью средств для поддержания рабочей температуры (нагреватель и тепловая изоляция), лазер нагревается и происходит испарение металла. Пары металла заполняют разрядный объем и генерирующий объем. Атомы активного металла в разрядном объеме возбуждаются с помощью разряда, горящего между электродами. Резонансное излучение атомов активного металла через прозрачную трубку попадает в генерирующий объем, где и поглощается атомами активного металла. в результате поглощения

излучения накачки активные атомы возбуждаются и возникает инверсия населенностей резонансного и метастабильного уровня атомов активного металла [10].

Для передачи большего количества энергии электронам в ГРТ инициируется аномальный тлеющий разряд. Когда в разряде участвует вся поверхность катода, обращенная к аноду, то дальнейшее уменьшение сопротивления и увеличение разрядного тока приводит к существенному увеличению разрядного напряжения. В этом случае плотность тока у катода и катодное падение потенциала превышают нормальные значения. Такая форма разряда называется аномальным тлеющим разрядом [11].



Рисунок 1.6 – ВАХ аномального тлеющего разряда [11]

В газовую смесь добавляется буферный газ (неон под давлением 25-50 мм рт. ст.) [6]. Буферный газ позволяет достичь несколько целей:

- сформировать разряд в ГРТ;
- вывести лазерное излучение;
- дезактивация метастабильного уровня;
- уменьшить длину диффузии паров меди (защита выходных окон от осаждения меди) [6].

Основная проблема ЛПМ заключается в том, что для достижения высокого коэффициента усиления активной среды необходимо создать

высокое давление паров активного вещества (0,1 – 1 торр). Для этого необходимо достичь относительно высокой температуры в ГРТ (более 1000 К). Такая температура не только требует затрат энергии, но и снижает срок эксплуатации ГРТ. В связи с этим, широкое распространение получили лазеры на парах галогенидов меди (ЛПГМ). Наиболее популярной активной средой для ЛПГМ является бромид меди (CuBr). Молекулы CuBr обладают намного большей летучестью, чем атомы меди, следовательно, для обеспечения газового разряда требуется более низкая температура. Существует конструкция ГРТ, предназначенная для ЛПГМ, в которой активное вещество располагается в определенных ячейках.

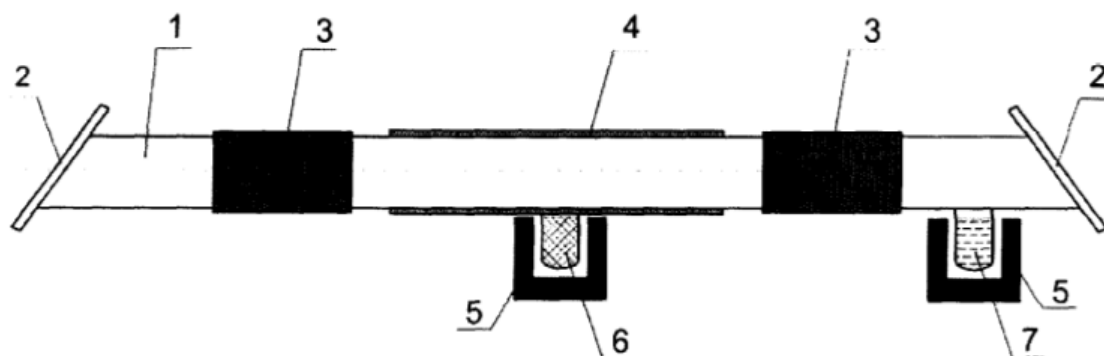


Рисунок 1.7 – Конструкция активного элемента лазера. 1 – ГРТ; 2 – выходные окна; 3 – электроды; 4 – теплоизолятор рабочего канала; 5 – нагреватели контейнеров; 6 – контейнер для размещения рабочего вещества; 7 – дополнительная емкость с адсорбентом [12]

Из рисунка видно, что рабочее вещество (CuBr) располагается в объеме ГРТ. Связано это не только с более простой конструкцией, но и с возможностью поддержания необходимой концентрации активного вещества благодаря наличию адсорбента. Также видно, что электроды располагаются на внешней стороне ГРТ. Согласно [12] и [13], основная проблема ЛПГМ – осаждение активного вещества на электродах. Из-за своей летучести молекулы CuBr оседают на поверхности электродов, разрушая их. Единственное возможное решение проблемы – вынос электродов на

поверхность ГРТ. Кроме того, такая конструкция позволяет создавать гибридный лазер с добавками H_2 или HBr без угрозы повреждения электродов.

1.3. Гибридный лазер

Гибридным называется лазер на парах меди или бромида меди с добавкой водорода или бромводорода. Внедрение различных добавок имело цель создания лазера с высокой частотой следования импульсов, поскольку возникает проблема создания эффективных условий генерации. Согласно [14], из-за медленной рекомбинации плазмы (при увеличении давления буферного газа) не удастся поднять напряжение на ГРТ до значений, требующих поддержания электронной температуры на нужном уровне, а также поддерживать оптимальную рабочую температуру при увеличении ЧСИ генерации. Медленная рекомбинация плазмы связана со снижением эффективности механизма амбиполярной диффузии плазмы. Поэтому необходимо перейти от механизма амбиполярной диффузии к объемной рекомбинации.

Создать механизм объемной рекомбинации можно с помощью передачи энергии третьей частицы (трехчастичная рекомбинация). В качестве третьей частицы и выступает водород. Водород позволяет создать условия быстрого охлаждения электронов, так как скорость трехчастичной рекомбинации зависит от температуры электронов.

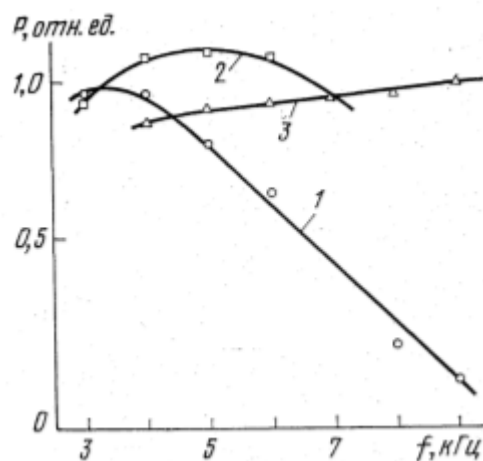


Рисунок 1.8 – Зависимость мощности генерации от ЧСИ при добавке водорода для трубки диаметром 27 мм длиной 25 см с индуктивностью 2 мкГн: 1 – без водорода; 2 - $\rho_{H_2} = 0,35$ мм. рт. ст.; 3 - $\rho_{Ne} = 18$ мм. рт. ст. [14]

И атом, и молекула водорода способны быстро охлаждать электроны как вследствие минимального среди всех элементов и соединений отношения их массы к массе электрона, так и из-за большого сечения упругого соударения [15]. Однако молекула водорода имеет большое сечение возбуждения колебательных состояний при малых энергиях. Следовательно, в плазме лазера желательно присутствие водорода только в атомарном состоянии, так как положительная роль увеличения скорости охлаждения электронов, и, следовательно, скорости рекомбинации может нивелироваться увеличением потерь энергии электронов [14]. Иначе не удастся поддержать нужную электронную температуру, необходимую для заселения рабочих уровней лазера.

ЛПМ с высокой ЧСИ без добавок H_2 можно получить только с использованием узкой ГРТ. Связано это с тем, что необходима быстрая релаксация атомов меди в основное состояние. Однако даже в этом случае ЧСИ не превышает 160 кГц. В работах [16] и [17] приведены экспериментальные результаты с ЧСИ 400 кГц и 250 кГц соответственно.

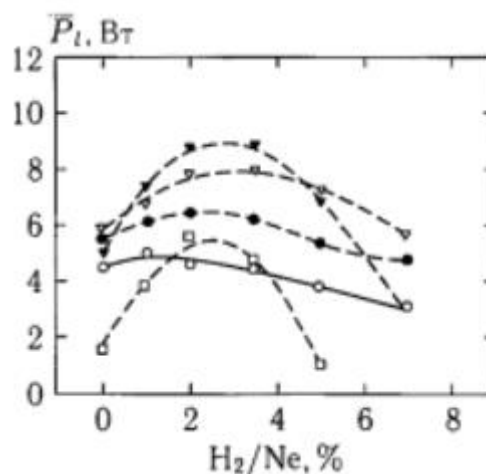


Рисунок 1.9 – Зависимость мощности излучения ЛПМ при работе на разных ЧСИ от давления водорода: ○ - 3,2 кГц; ● - 4,3 кГц; ▽ - 6 кГц; ▼ - 9,2 кГц; □ - 19,7 кГц [18]

Из рисунка видно, что для каждой ЧСИ имеется определенный пик средней мощности, находящийся на уровне 2 – 4 %. При чем, чем больше ЧСИ, тем пиковое значение выше. Отчетливо видно, что снижение концентрации водорода приведет к замедлению рекомбинации плазмы, а повышение – к торможению электронов.

Кроме того, добавка водорода улучшает согласование источника накачки с ГРТ, облегчает работу тиратрона, а также увеличивает температуру стенки ГРТ [18]. Кроме того, улучшаются характеристики пучка.

В работе [19] показаны отличия осциллограмм тока, напряжения и мощности генерации с добавлением H₂ и без (рисунок).

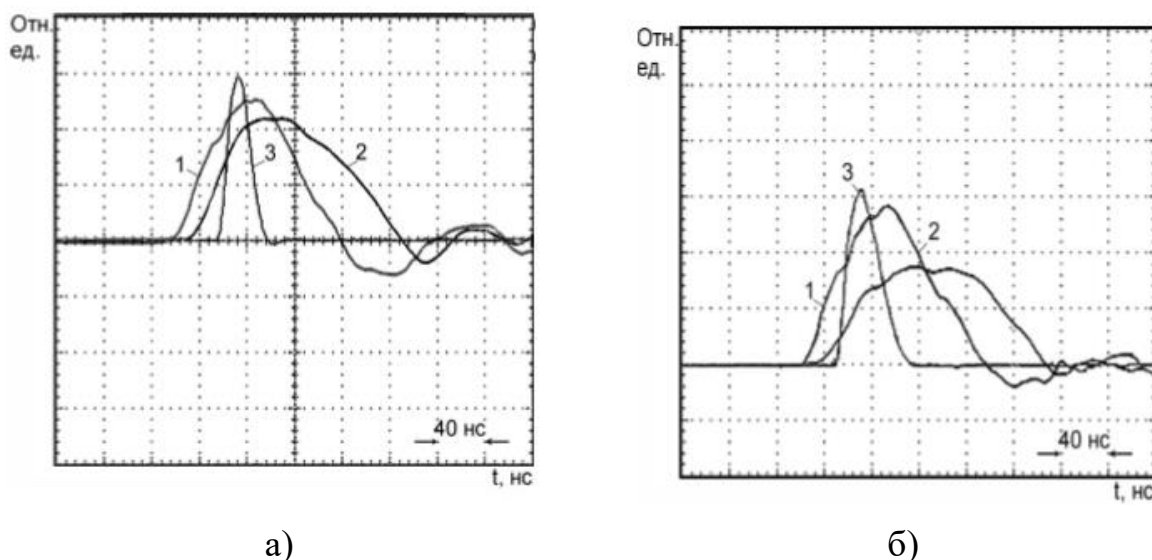


Рисунок 1.10 – Осциллограммы импульсов: 1) напряжения, 2) тока и 3) генерации для ГРТ диаметром 3,6 см, длиной 120 см, при частоте следования импульсов накачки 16 кГц: а) разряд в Ne, без добавок Н₂ (средняя мощность излучения, суммарная по двум линиям – 13 Вт), б) с добавкой Н₂ (мощность излучения – 25 Вт) [19]

Отчетливо видно, что при добавлении Н₂ в ГРТ происходит задержка нарастания тока и увеличение напряжения. Следствием этого является рост длительности импульса генерации. Связано это с электроотрицательностью водорода.

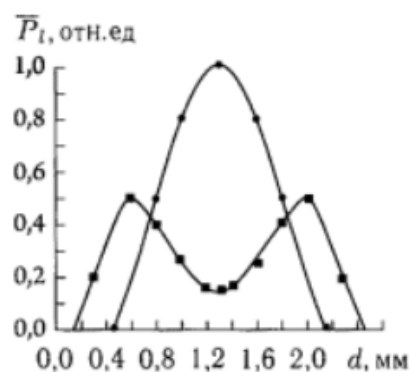


Рисунок 1.11 – Радиальное распределение суммарной мощности излучения лазера при максимальном значении 10 Вт с добавкой Н₂ (максимум на оси) и без добавки Н₂ с мощностью излучения 5 Вт с провалом на оси[18]

Из рисунка видно, что пучок гибридного лазера уже, однако не имеет провала в центре. Максимум мощности приходится практически на ось.

Добавка H_2 производится с помощью селективного реверсивного натекателя водорода (СРНВ).

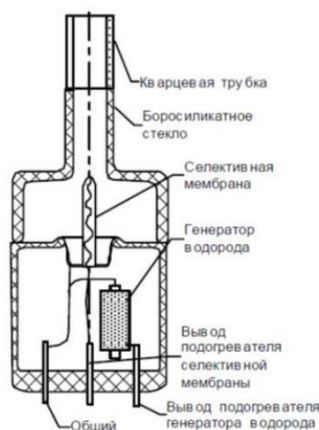


Рисунок 1.12 – Селективный реверсивный натекатель водорода

Несмотря на схожий эффект на выходное излучение, добавка HBr обладает определенным преимуществом. В отличие от СРНВ, удалить излишки бромводорода можно не изменяя давление буферного газа – неона [18].

1.4. Область применения

ЛПМ имеет весьма широкий спектр применения как в промышленности, так и в научных исследованиях. Так, например, появилась новая методика спектроскопии – нелинейная спектроскопия. Высокая интенсивность лазерного излучения позволяет наблюдать явления, обусловленные нелинейным откликом среды [20].

Определенную конкурентоспособность имеет получение нанопорошков методом лазерной абляции. Несмотря на относительную дороговизну технологии, данный метод позволяет получить наиболее чистые порошки, а также дает возможность получать порошки разного состава. Целесообразно для данной задачи применять импульсно-периодический лазер

ввиду меньших потерь на теплопроводность. Несмотря на то, что в работе [21] для получения нанопорошков применялся CO₂-лазер, данную установку возможно создать и на базе ЛПМ.

Благодаря излучению в видимом диапазоне, высокой ЧСИ и средней мощности излучения ЛПМ активно применяется в оборудовании для прецизионной микрообработки. В [22] описан принцип работы автоматизированной лазерной технологической установки (АЛТУ) «Каравелла - 1». Лазерная технология позволяет существенно увеличить производительность труда, повысить качество микрообработки при снижении себестоимости и, следовательно, стать весьма конкурентоспособным методом обработки материалов.

Активно внедряются лазерные технологии и в медицину. Наиболее известными отечественными установками являются «Янтарь-2Ф» и «Яхрома-Мед». Установки созданы на базе ЛПМ «Курс». «Янтарь-2Ф» предназначена для разрушения участков с атеросклеротическим поражением, также может применяться при внутриполостном лечении (оториноларингология, гинекология и пр.). «Яхрома-Мед» применяется в дерматологии и косметологии [1].

1.5. Выводы к главе 1

ЛПМ имеет универсальную конструкцию, позволяющую создать на его базе установки для различных областей применения. На данный момент основная задача – дальнейшее повышение качества импульса генерации, совершенствование конструкции, а также создание системы управления ЧСИ и мощностью генерации. Это позволит создать автоматизированную технологическую установку

2. Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступает ЛПБМ, возбуждаемый цугами импульсов. Интерес к данному способу возбуждения вызван желанием получить стабильную среднюю мощность генерации. Кроме того, известно, что в лазерах на парах металлов необходимо, как минимум, два импульса: один – для диссоциации активного вещества, второй – для возбуждения атомов металла [23].

2.1. Возбуждение лазеров на парах металлов цугами импульсов

Данный эксперимент был впервые проведен для лазера на парах хлорида меди [23]. Цель эксперимента заключалась в создании такой системы питания лазера, которая позволила бы изменять ЧСИ без изменения мощности разряда. Сам источник питания представлял из себя генератор синусоидального сигнала, работающий в определенном диапазоне частот и подвергшийся стробированию, т.е. увеличению вероятности нахождения полезного сигнала на определенном интервале.

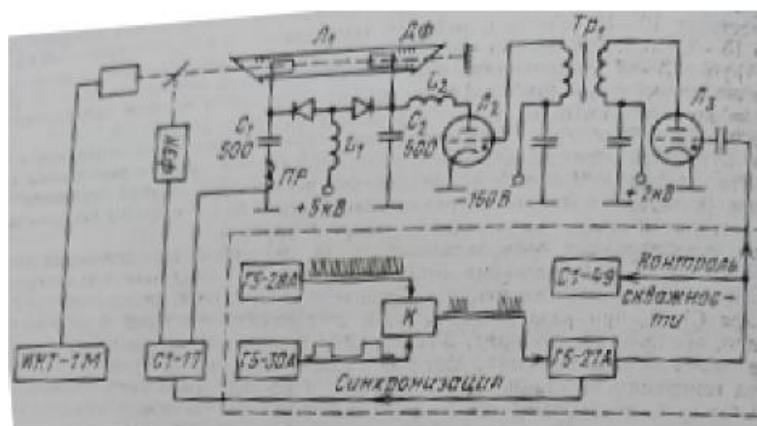


Рисунок 2.1 – Схема CuCl лазера с системой стробирования [23]

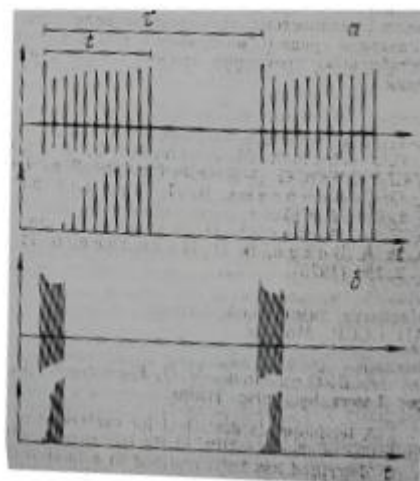


Рисунок 2.2 – Осциллограммы импульсов разрядного тока (верхний луч) и генерации (нижний луч) в режиме стробирования: а) $\tau = 2$ мс; $S = 2$; $f = 10$ кГц; б) $\tau = 2$ мс; $S = 10$; $f = 50$ кГц [23]

На рисунке 2.2 показаны цуги импульсов, на рисунке 2.3 – одиночные импульсы.

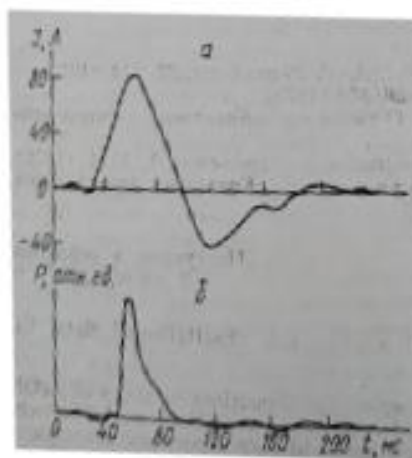


Рисунок 2.3 – Импульсы разрядного тока (а) и генерации (б)

Также, изменяя параметры цуга импульсов, а именно, частоту, можно существенно влиять на параметры импульса генерации, в частности, на его длительность, что и продемонстрировано в работе [3]. Однако при этом импульс генерации значительно искажается.

Авторы [23] отмечают, что режим стробирования позволяет получить фиксированную температуру генерации и, как следствие, стабильность пучка.

Однако данный способ нельзя использовать для управления мощностью генерации.

Эксперимент по управлению мощности и энергии генерации приведен в работе [24], которая представляет из себя повтор эксперимента, приведенного в [25], но для ЛПБМ. Суть эксперимента заключается в создании кратковременного спада тока на фронте импульса генерации, после чего производится дальнейшее наращивание тока до максимального значения.

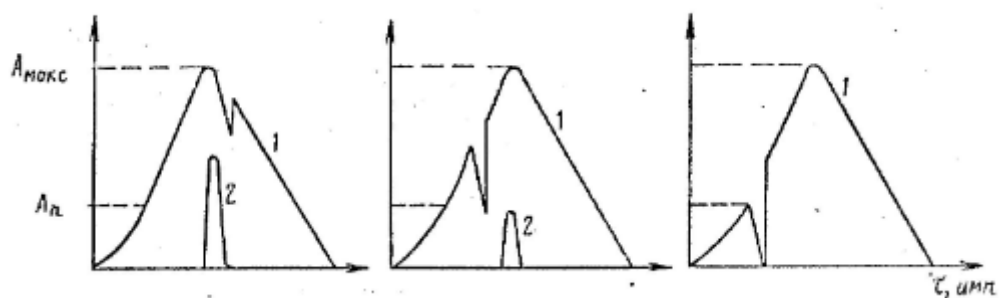


Рисунок 2.4 – Импульс генерации (2) и импульс тока (1) со спадом: а) на вершине импульса возбуждения; б) в промежутке между пороговой и максимальной амплитудой; в) на уровне пороговой амплитуды [23]

Из рисунка видно, что управлять мощностью генерации можно, создавая спады в промежутке между пороговой и максимальной амплитудами, при чем, чем ближе к пороговой амплитуде, тем меньше амплитуда генерации. На уровне пороговой амплитуды генерация пропадает, т.е. появляется возможность перевести лазер в т.н. ждущий режим [25]. Несмотря на то, что эксперимент проводился на ЛПМ, для ЛПБМ ситуация аналогична, что и подтверждает [24].

Такая методика возбуждения называется двухимпульсной. Она позволяет регулировать мощность генерации, а также выделить необходимый спектр излучения (желтый или зеленый). Однако эффективна данная методика только при неизменной ЧСИ.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа		ФИО	
4Т61		Карасев Николай Викторович	

Школа	ИШНПТ	Отделение Школа	Отделение материаловедения
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	13.03.02 «Электротехника и электротехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ конкурентных технических решений НИ</i>	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения НИ</i>	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта НИ</i>	Расчет бюджетной стоимости НИ
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности НИ</i>	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала

1. Оценка конкурентоспособности ИП
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10.02.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кащук Ирина Вадимовна	К.Т.Н доцент		10.02.2020

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Т61	Карасев Николай Викторович		10.02.2020

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

В ходе исследования будут рассматриваться три варианта реализации CuBr-лазера с увеличенной длительностью импульсов генерации:

1. CuBr-лазер, возбуждаемый цугами импульсов с одним источником питания;
2. CuBr-лазер, возбуждаемый цугами импульсов с двумя параллельными источниками питания;
3. Гибридный лазер (CuBr с добавкой HBr) возбуждаемый цугами импульсов с двумя параллельными источниками питания.

Поскольку необходим объективный анализ достоинств и недостатков каждого варианта исполнения, необходимо провести анализ. В таблице 4.1 показано сравнение разработок-конкурентов и разработки данного НИ с точки зрения технических и экономических критериев оценки эффективности.

Таблица 4.1 – Сравнение конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Актуальность исследования	0,06	3	5	5	0,18	0,3	0,3
2. Температура бромида меди	0,2	5	5	5	0,1	0,1	0,1
3. Выход активного вещества	0,06	4	5	5	0,24	0,3	0,3
4. Качество пучка	0,12	4	4	5	0,48	0,48	0,6
5. Диапазон рабочих частот	0,08	4	4	5	0,32	0,32	0,4

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
1	2	3	4	5	6	7	8
6. Длительность импульсов генерации	0,14	4	4	5	0,56	0,56	0,7
7. Энерговклад в генерацию	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
8. Безопасность	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
2. Цена сырья	0,03	4	4	3	0,12	0,12	0,09
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
4. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,02	3	3	3	0,06	0,06	0,06
Итого	1	48	51	51	3,32	3,5	3,61

Расчет конкурентоспособности, на примере качества пучка гибридного лазера определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,12 \cdot 5 = 0,6,$$

где K – конкурентоспособность проекта; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл показателя.

Из приведенного анализа видно, что гибридный лазер, хотя и незначительно проигрывает по экономическим критериям эффективности, выходит вперед по техническим критериям эффективности. Связано это с решением более широкого спектра задач, а также с улучшением качества пучка.

4.1.2 SWOT – анализ

Для исследования внешней и внутренней среды проекта, в этой работе проведен SWOT-анализ с детальной оценкой сильных и слабых сторон исследовательского проекта, а также его возможностей и угроз.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны НИ и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
C1. Универсальность конструкции	Сл1. Наличие деталей, изготавливаемых по индивидуальному заказу.
C2. Широкий спектр применения	Сл2. Дороговизна технологии
C3. Экологичность технологии.	Сл3. Большой комплекс проводимых исследований перед пуском в серийное производство
C4. Относительная простота регулировки мощности	
C5. Низкая стоимость источника накачки	
C6. Наличие спроса на технологию	
Возможности	Угрозы
B1. Возможность создания мощного импульсного лазера	У1. Создание конкурентами производственного прототипа
B2. Возможность применения в различных отраслях: от промышленности до медицины	У2. Развитая конкуренция технологий производства
B3. Возможность построения лабораторной установки	

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 4.3–4.6.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта							
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	B1	+	+	-	-	-	-
	B2	+	+	-	+	+	+

	V3	+	+	-	+	-	-
--	----	---	---	---	---	---	---

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	-	+	-
	B2	+	+	+
	B3	-	0	-

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

Сильные стороны проекта							
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6
	У1	-	+	-	-	-	+
	У2	+	+	-	-	-	+

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

Слабые стороны проекта				
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	-	-	+
	У2	-	+	-

Результаты анализа представлены в итоговую таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта С1. Универсальность конструкции С2. Широкий спектр применения С3. Экологичность технологии. С4. Относительная простота регулировки мощности С5. Низкая стоимость источника накачки С6. Наличие спроса на технологию	Слабые стороны научно-исследовательского проекта Сл1. Наличие деталей, изготавливаемых по индивидуальному заказу. Сл2. Дороговизна технологии Сл3. Большой комплекс проводимых исследований перед пуском в серийное производство
Возможности В1. Возможность создания мощного	Направления развития В1С1С2; В2С1С2; В3С1С2. Универсальность конструкции	Сдерживающие факторы В1Сл2. Существует спектр задач (в т.ч. промышленных),

импульсного лазера В2. Возможность применения в различных отраслях: от промышленности до медицины В3. Возможность построения лабораторной установки.	и, как следствие, широкий спектр применений позволяет создать на базе CuBr – лазера практически любую установку, что существенно расширяет номенклатуру выпускаемой продукции. В2С4С5С6. Простота регулировки параметров существенно облегчает работу оператора, а низкая стоимость источника накачки позволяет перезаряжать установку по истечении срока выработки. В3С4. Установка может использоваться для обучения студентов благодаря простоте регулирования параметров	решить которые может лазер большой мощности. Несмотря на высокую стоимость, в некоторых случаях такая технология является незаменимой. В2Сл1Сл2Сл3. Существует комплекс операций, невозможных для выполнения иным способом, кроме лазерного излучения. Также ключевую роль играет безопасность установки на производстве.
Угрозы У1. Создание конкурентами производственного прототипа У2. Развитая конкуренция технологий производства	Угрозы развития У1С2С6. Производственный прототип необходимо дорабатывать для снижения количества возможных неисправностей при эксплуатации. У2С1С2С6. Несмотря на конкуренцию, благодаря широкому спектру применения возможно занять определенную технологическую нишу.	Уязвимости: У1Сл3. При производстве лазерного оборудования важную роль играет безопасность не только оператора, но и (например, в офтальмологии) клиента. В данном случае большое количество испытаний является вынужденной мерой. У2Сл2. Из-за наличия деталей, изготавливаемых по индивидуальному заказу добиться значительного удешевления конструкции крайне трудно, а в случае, когда определяющими факторами являются надежность и безопасность, практически невозможно.

SWOT – анализ показывает, что основная угроза связана с наличием конкурентов и их возможностью первыми создать прототип. Однако ключевую роль в лазерной технике играет безопасность. Чем больший комплекс технологических испытаний пройдет прототип, тем выше окажется его безопасность для пользователя. Кроме того, существует спектр технологических операций, осуществимых только мощным лазерным

излучением малой длительности импульсов. Также широкая область применения и универсальная конструкция позволяют создать различные виды установок на единой базе, тем самым, унифицировав их.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Комплекс предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках исследования;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ;
- построить график проведения отдельных этапов исследования.

Для выполнения данного исследования (проекта) необходимо сформировать рабочую группу, в состав которой входят руководитель и инженер. Для каждой из запланированных работ, необходимо выбрать исполнителя этой работы.

Разработанный список задач и производимых работ, в рамках проектирования, а также распределение исполнителей по этим работам, представлен в виде таблицы 4.8.

Таблица 4.8 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	4	Календарное планирование работ по проекту	Руководитель
Проведение эксперимента	5	Ознакомление с установкой, настройка измерительных приборов	Инженер
	6	Снятие показаний установки, необходимых для анализа	

Обобщение и оценка результатов	7	Обработка осциллограмм и составление графиков	Инженер
	8	Сравнение показаний при разных режимах работы и анализ экспериментальных данных	Руководитель Инженер
Контроль и координирование проекта	9	Консультация в ходе выполнения эксперимента	Руководитель
Отчетность по проведенным экспериментам	10	Написание научной статьи	Руководитель
	11	Оформление отчета по УИРС	Инженер

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки НИ составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта.

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ожі}$ определяется по формуле:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{\min i}$ – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой: при удачном стечении обстоятельств), чел.-дн.; $t_{\max i}$ – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой: при неудачном стечении обстоятельств, чел.-дн.

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p :

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{q_i},$$

где q_i – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 4.9.

4.2.3 Разработка графика проведения исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ.

Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для построения графика Ганта, следует, длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой, для каждого исполнителя расчеты производятся индивидуально:

$$T_{ki,рук} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

$$T_{ki,инж} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где $k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал,рук} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

$$k_{кал,инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{кал}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Проведение эксперимента»:

$$t_{ожг} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 10}{5} = 7,6 \text{ чел.} - \text{дн.},$$

$$T_{pi} = \frac{t_{ожг}}{q_i} = \frac{7,6}{1} = 7,6 \text{ раб.дн.}.$$

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$k_{\text{кал.инж}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 118} = 1,48,$$

где $T_{\text{вых}}; T_{\text{пр}}$ - количество выходных и праздничных дней соответственно. В 2020 для пятидневной рабочей недели было 118 выходных и праздничных дней.

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Проведение эксперимента»:

$$T_{\text{к.инж}} = T_{\text{рi}} \cdot k_{\text{калю.инж}} = 7,6 \cdot 1,48 = 11,25 \approx 11 \text{ кал.дн.}.$$

Расчет календарного коэффициента для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 66} = 1,22.$$

Расчет трудоемкости и продолжительности работ, на примере задачи «Разработка технического задания»:

$$t_{\text{ожi}} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{maxi}}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1,8 \text{ чел.-дн.},$$

$$T_{\text{рi}} = \frac{t_{\text{ожi}}}{\text{Ч}_i} = \frac{1,8}{1} = 1,8 \text{ раб.дн.}.$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:














$$T_{\text{к.рук}} = T_{\text{рi}} \cdot k_{\text{кал.рук}} = 1,8 \cdot 1,22 = 2,2 \approx 2 \text{ кал.дн.}.$$

Все полученные значения в календарных днях округляются до целого числа, а затем сводятся в таблицу 4.9.

Таблица 4.9 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительно сть работ в рабочих днях T_{pi}		Длительно сть работ в календарн ых днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожi}$, чел-дни					
	Руководит ель	Инженер	Руководит ель	Инженер	Руководит ель	Инженер	Руководит ель	Инженер	Руководит ель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	1	-	3	-	1,8	-	1,8	-	2	-
Выбор направления исследований	1	1	3	3	1,8	1,8	0,9	0,9	1	1
Подбор и изучение материалов по теме	-	5	-	8	-	6,2	-	6,2	-	9
Календарное планирование работ по проекту	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	3	-
Ознакомление с установкой, настройка измерительных приборов	-	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2
Снятие показаний установки, необходимых для анализа	-	6	-	10	-	7,6	-	7,6	-	11
Обработка осциллограмм и составление графиков	-	8	-	10	-	8,8	-	8,8	-	13
Сравнение показаний при разных режимах работы и анализ экспериментальных данных	2	2	4	4	2,8	2,8	1,4	1,4	2	2
Консультация в ходе выполнения эксперимента	3	-	5	-	3,8	-	3,8	-	5	-
Написание научной статьи	10	-	14	-	11,6	-	11,6	-	14	-
Оформление отчета по УИРС	-	2	-	4	-	2,8	-	2,8	-	4

После расчета и сведения в таблицу временных показателей проектирования, на основе полученной таблицы строится диаграмма Ганта.

№ п/п	Этап работы	Исполнители	$T_{\text{к}}$, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ							
				Февр.	Март			Апрель			
				3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2								
2	Выбор направления исследований	Руководитель; инженер	2	 							
3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	9								
4	Календарное планирование работ по проекту	Руководитель	3								
5	Ознакомление с установкой, настройка измерительных приборов	Инженер	2								
6	Снятие показаний установки, необходимых для анализа	Инженер	11								
7	Обработка осциллограмм и составление графиков	Инженер	13								
8	Сравнение показаний при разных режимах работы и анализ экспериментальных данных	Руководитель; инженер	4				 				
9	Консультация в ходе выполнения эксперимента	Руководитель	5								
10	Написание научной статьи	Руководитель	14								
11	Оформление отчета по УИРС	Инженер	4								



 - руководитель  - инженер

Рисунок 4.1 – Диаграмма Ганта

Таблица 4.10 – Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	69
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	42
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	27

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

4.2.4 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице 17.

4.2.4.1 Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 4.11. Все числа приведены для третьего варианта исполнения

Таблица 4.11 – Сырье, материалы и комплектующие изделия

Наименование	Количество, шт.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Порошок CuBr	0,02 кг	800*	16
Порошок HBr	0,02 кг	64**	1280
Импульсный источник питания (общая стоимость комплектующих)	2	6400	12800
Схема запуска тиратрона (общая стоимость комплектующих)	2	2380	4760
Итого:	18856		

* - цена указана за 1 кг;

** - цена указана за 1 г.

4.2.4.2 Специальное оборудование для экспериментальных работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Таблица 4.12– Специальное оборудование для экспериментальных работ

Наименование оборудования	Количество единиц, шт.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Газоразрядная трубка (ГРТ)	1	200000	200000
Тиратрон ТГИ1-1000/25	1	12500	12500
Тиратрон ТГИ1-500/16	1	18500	18500
Лабораторный автотрансформатор (ЛАТР)	2	4600	9200
Итого	240200		

Т.о., общие затраты на опытный образец составили 259056 руб.

4.2.4.3 Расчет амортизации специального оборудования

Расчёт амортизации производится на находящееся в использовании оборудование. В итоговую стоимость проекта входят отчисления на амортизацию за время использования оборудования в статье накладных расходов.

Таблица 4.13 – Специальное оборудование для экспериментальных работ

Наименование оборудования	Срок полезного использования, лет	Количество единиц, шт.	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2	5	1	38670	38670
Осциллограф LeCroy WJ-324	10	1	207150	207150
Итого				

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m,$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Норма амортизации для осциллографа:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{10} = 0,1.$$

Амортизации для:

Осциллограф:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m = \frac{0,1 \cdot 207150}{12} \cdot 3 = 6214 \text{ руб.}$$

Измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m = \frac{0,2 \cdot 38670}{12} \cdot 3 = 1933,5 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты амортизационных отчислений:

$$A = 6214 + 1933,5 = 8147,5 \text{ руб.}$$

4.2.4.4 Основная заработная плата

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $З_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где $З_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (табл. 4.9).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_\partial} = \frac{40950 \cdot 10,3}{247} = 1707,6 \text{ руб.},$$

где $З_m$ – должностной оклад работника за месяц; F_∂ – действительный годовой фонд рабочего времени исполнителей, раб.дн. (табл. 4.14); M – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

- при отпуске в 28 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. Дней $M = 10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя;

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_\partial} = \frac{31200 \cdot 11,2}{214} = 1640,6 \text{ руб.}.$$

Должностной оклад работника за месяц:

Для руководителя:

$$З_m = З_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_\partial) k_p = 21000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 40950 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_m = З_{мс} \cdot (1 + k_{np} + k_\partial) k_p = 16000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 31200 \text{ руб.},$$

где $З_{мс}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб. (для Института оптики атмосферы СО РАН); k_{np} – премиальный коэффициент, равен 0,3; k_{δ} – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 4.14 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	52/14	104/14
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48/5	24/10
Действительный годовой фонд рабочего времени	247	214

Таблица 4.15 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$З_{мс}, руб$	k_{np}	k_{δ}	k_p	$З_{м}, руб$	$З_{\delta n}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$З_{осн}, руб$
Руководитель	21000	0,3	0,2	1,3	40950	1707,6	23	39274
Инженер	16000	0,3	0,2	1,3	31200	1640,6	29	47577
Итого:								86851

4.2.4.5 Дополнительная заработная плата

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

Для руководителя:

$$З_{\delta on} = k_{\delta on} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 39274 = 5891,1 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{\delta on} = k_{\delta on} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 47577 = 7136,5 \text{ руб.},$$

где $k_{\delta on}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

4.2.4.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

Для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (39274 + 5891,1) = 13549,5 \text{ руб.}$$

Для инженера:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (47577 + 7136,5) = 16414 \text{ руб.},$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

4.2.4.7 Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, такие как: печать и ксерокопирование проектировочных документов, оплата услуг связи.

Накладные расходы в целом для третьего варианта исполнения:

$$\begin{aligned} З_{накл} &= (\text{сумма статей } 1 \div 6) \cdot k_{нр} = \\ &= (8147 + 18856 + 240200 + 86851 + 13027,6 + 29963,5) \cdot 0,2 = 79409 \text{ руб.}, \end{aligned}$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ (название темы) по форме, приведенной в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Группировка затрат по статьям

Статьи									
Вариант исполнения	Амортизация	Сырье, материалы	Специальное оборудование	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Итого бюджетная стоимость
1	8147	11176	235600	86851	13027,6	29963,5	384765,1	76953	461718,1
2	8147	17576	240200	86851	13027,6	29963,5	395765,1	79153	474918,1
3	8147	18856	240200	86851	13027,6	29963,5	397045,1	79409	476454,1

4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

4.3.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

Данный показатель получается в процессе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения рассмотрены:

1. CuBr-лазер, возбуждаемый цугами импульсов с одним источником питания;
2. CuBr-лазер, возбуждаемый цугами импульсов с двумя параллельными источниками питания;
3. Гибридный лазер (CuBr с добавкой HBr) возбуждаемый цугами импульсов с двумя параллельными источниками питания.

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{B1} = 461718,1$ руб, $\Phi_{B2} = 474918,1$ руб, $\Phi_{B3} = 476454,1$ руб.

$$I_{\text{финр}}^{B1} = \frac{\Phi_{B1}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{461718,1}{476454,1} = 0,97;$$

$$I_{\text{финр}}^{B2} = \frac{\Phi_{B2}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{474918,1}{476454,1} = 0,99;$$

$$I_{\text{финр}}^{B3} = \frac{\Phi_{B3}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{476454,1}{476454,1} = 1.$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по трем вариантам разработки вариант исполнения 1 признан наиболее приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

4.3.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР (I_{pi}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 4.17).

Таблица 4.17 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИ

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1. Безопасность при использовании установки	0,3	4	4	4
2. Помехоустойчивость	0,2	4	4	4
3. Способствует росту производительности труда пользователя	0,2	4	5	5
4. Энергосбережение	0,1	5	4	4
5. Удобство в эксплуатации	0,2	3	4	4
ИТОГО	1	3,9	4,2	4,2

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности:

$$I_{B1} = 0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,1 \cdot 5 + 0,2 \cdot 3 = 3,9;$$

$$I_{B2} = 0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 = 4,2;$$

$$I_{B3} = 0,3 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 = 4,2;.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр.i}}.$$

$$I_{B1} = \frac{3,9}{0,97} = 4,02, \quad I_{B2} = \frac{4,2}{0,99} = 4,24, \quad I_{B3} = \frac{4,2}{1} = 4,2.$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 4.18).

Таблица 4.18 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,97	0,99	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,9	4,2	4,2
3	Интегральный показатель эффективности	4,02	4,24	4,2
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	0,95	1	0,99

Из данных, приведенных в таблице 4.18, видно, что финансовая и ресурсная эффективность всех трех вариантов имеет минимальные расхождения, однако наиболее эффективным признан вариант исполнения 2 (CuBr-лазер, возбуждаемый цугами импульсов с двумя параллельными источниками питания). Связано это с большей финансовой эффективностью по сравнению с третьим и большей ресурсоэффективностью по сравнению с первым.

Выводы по разделу

В результате анализа наиболее выгодным в производстве был выбран вариант 2. Связано это с рядом причин:

1. высокая конкурентоспособность по сравнению с аналогами;
2. универсальность конструкции как ключевое достоинство разработки;
3. широкая область применения;
4. минимальные расхождения в стоимости при приблизительно равных трудозатратах (474918,1 руб. – промежуточное положение относительно двух других приведенных вариантов, показатель финансовой эффективности – 0,99);
5. интегральный показатель является самым высоким среди приведенных вариантов (4,24 против 4,02 и 4,2).

Однако данная установка имеет ряд недостатков по сравнению с аналогами. Так, например, первый вариант имеет более простую конструкцию и минимальную стоимость, а третий позволяет получить пучок более высокого качества. Таким образом, выбирать вариант исполнения необходимо в зависимости от конкретно стоящих производственных задач.